

a revista do engenheiro civil



apoio
IPT

www.piniweb.com
téchne

Edição 97 ano 13 abril de 2005 R\$ 19,00

ENTREVISTA

Waldemar Hachich

DOMÓTICA

Automação residencial

ÉTICA

Preço artificial
terá punição

SEGURANÇA DO TRABALHO

Cuidado! EPIs piratas

BLOCOS

Alvenaria
estrutural

ARTIGO

Método
das Bielas

Deformações estruturais

Revestimentos e alvenaria estouram e
mostram a incompatibilidade dos sistemas



Aplicação do Método das Bielas

A maioria dos elementos utilizados em concreto estrutural podem ser dimensionados de maneira simplificada, adotando-se a clássica Hipótese de Bernoulli, de que seções planas permanecem planas após a flexão. No entanto, existem várias situações para as quais essa hipótese simplificadora não pode ser aplicada, tais como: blocos rígidos sobre estacas, sapatas, consolos, vigas-parede e dentes Gerber.

Para tais casos deve-se recorrer a soluções mais eficazes de dimensionamento, como o Método das Bielas, que tem se mostrado uma alternativa muito racional.

Neste artigo, procura-se apresentar as principais características do Método das Bielas, bem como várias

Rafael Alves de Souza
Universidade Estadual de Maringá
rasouza2@uem.br
Túlio Nogueira Bittencourt
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo
tulio.bittencourt@poli.usp.br

propostas que podem auxiliar na aplicação prática do método. Deve-se observar que tais propostas podem ser de grande utilidade, uma vez que o código normativo brasileiro ainda não contempla orientações suficientes sobre o método.

Regiões B e D

Atualmente, para o dimensionamento de qualquer estrutura de con-

creto, convém identificar regiões distintas de comportamento, de maneira a se efetuar um dimensionamento seguro e eficaz. Basicamente, duas regiões bem definidas podem ser identificadas nas estruturas de concreto: "Regiões B" e "Regiões D".

As "Regiões B" seguem a "Hipótese de Bernoulli", isto é, pode-se assumir que as deformações ao longo da seção transversal são lineares desde o início do carregamento até a ruptura. Essas regiões correspondem basicamente ao caso das peças lineares (vigas e pilares), e as deformações provocadas pela flexão e pelo esforço normal são predominantes em relação às deformações provocadas pelo esforço cortante.

Em uma "Região B", a força de tração na armadura longitudinal varia ao

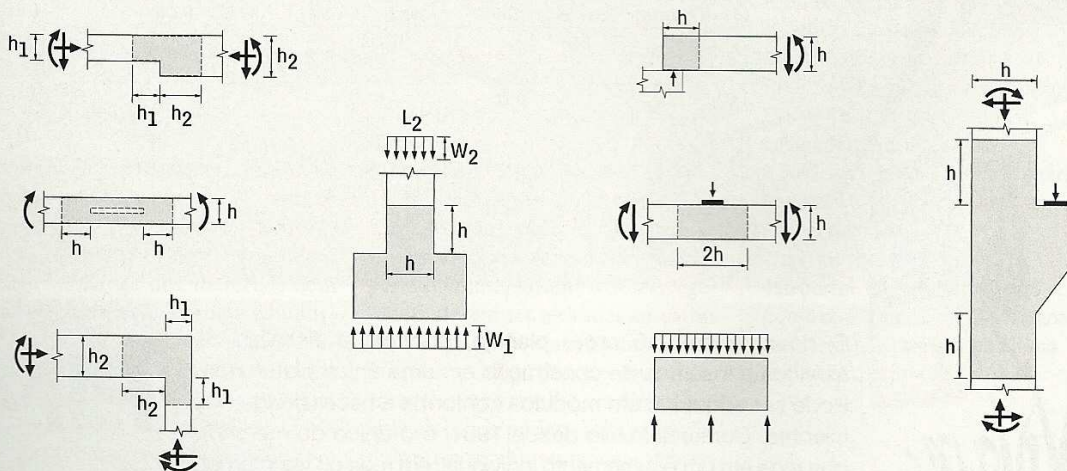


Figura 1 - Exemplos de "Regiões D" e seus contornos

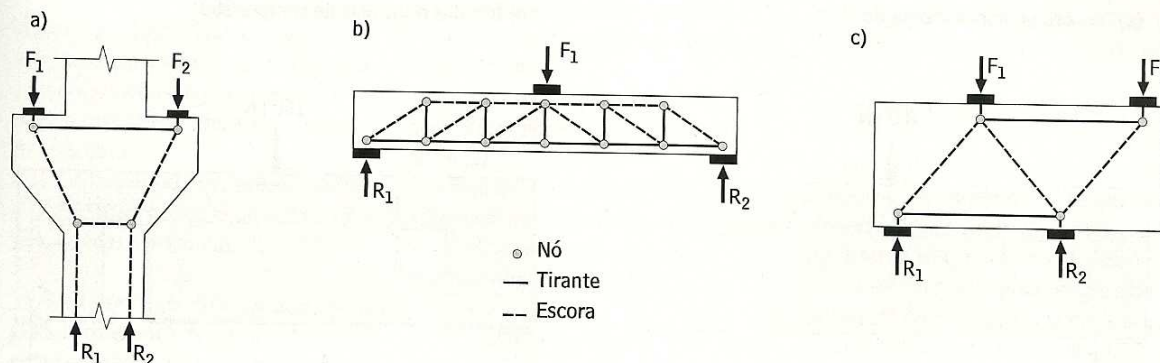


Figura 2 – Exemplos de aplicação do Método das Bielas: (a) Consolo, (b) Viga e (c) Viga-Parede em Balanço

longo do elemento, de maneira a balancear o momento fletor aplicado, mantendo o braço de alavanca interno relativamente constante. Por outro lado, em uma "Região D" a força de tração na armadura tende a permanecer constante, o braço de alavanca interno sofre variação e o elemento se comporta como se fosse um arco atirantado.

As "Regiões D" apresentam deformações não-lineares ao longo da seção transversal, e as rotinas convencionais de dimensionamento tornam-se inadequadas e até mesmo inseguras se aplicadas. Nessas regiões, que normalmente correspondem a detalhes de uma estrutura, observa-se um estado de tensão com claras discontinuidades, provocado essencialmente pela predominância das deformações resultantes do esforço cortante.

Em geral, as "Regiões D" se manifestam a partir de perturbações de ordem estática (causada pela presença de cargas) e geométrica (causada por mudanças bruscas na geometria), sendo que o comprimento dessas regiões pode ser definido aproximadamente a partir da altura do elemento estrutural (Princípio de Saint Venant), conforme ilustram os trechos cinzentos da figura 1.

Para essas regiões, frequentemente

te dimensionadas no passado utilizando critérios empíricos, convém aplicar o Método das Bielas, sendo que tal método possibilita um critério de dimensionamento sistemático, racional e seguro.

Elementos do Método das Bielas

O Método das Bielas tem como idéia principal a substituição da estrutura real por uma estrutura resistente na forma de treliça, que simplifica de maneira sistemática o problema original, conforme ilustram os exemplos da figura 2.

Nessa treliça hipotética os elementos comprimidos (que são elementos prismáticos de concreto) são denominados de escoras e os elementos traçados (que normalmente são barras de aço) são denominados de tirantes. Os pontos de interseção das escoras e dos tirantes no modelo, isto é, os pontos onde ocorrem a distribuição de forças entre as escoras e os tirantes, são chamados de "regiões nodais".

O nível de tensão estabelecido nas regiões nodais, bem como nas escoras, deve ser limitado a uma certa parcela da resistência à compressão do concreto, de maneira a evitar fissurações indesejáveis e até mesmo uma possibilidade de ruína prematura.

O Método das Bielas tem sua va-

lidade fundamentada no Teorema do Limite Inferior da Teoria da Plasticidade. Basicamente, esse teorema estabelece que, se existe uma carga para a qual pode-se encontrar um estado de tensão estável e estaticamente admissível, existe a garantia que essa carga será inferior à carga de ruína da estrutura. Para isso, os tirantes devem escoar antes das escoras e das regiões nodais entrarem em ruptura.

Estratégias para a definição dos modelos de escoras e tirantes

Uma vez identificada a "Região D", bem como definidas as forças atuantes em sua fronteira, deve-se partir para a definição de um modelo de treliça representativo em relação ao campo de tensões internas atuantes na estrutura. No entanto, a definição de tais modelos nem sempre é uma tarefa trivial e a experiência e sensibilidade são fatores decisivos para a adoção de um modelo satisfatório.

Os modelos resultantes da aplicação do Método das Bielas, isto é, as treliças concebidas para o dimensionamento das "Regiões D", são denominados de modelos de escoras e tirantes. Sua definição pode ser facilitada baseando-se nos seguintes critérios, em ordem decrescente de »

ARTIGO

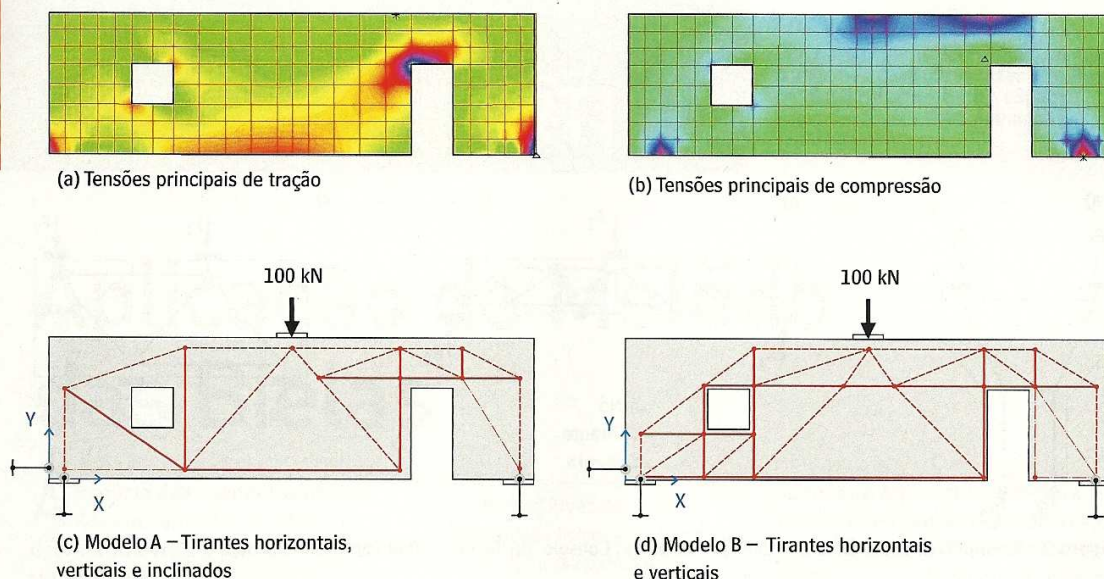


Figura 3 – Exemplo de desenvolvimento de Modelos de Escoras e Tirantes baseado em tensões principais obtidas com o auxílio do Método dos Elementos Finitos

praticidade: modelos padronizados disponíveis nos códigos normativos, aplicação do Caminho das Cargas (*Load Path Approach*), análises lineares ou não-lineares (com fissuração do concreto) utilizando o Método dos Elementos Finitos, ensaios experimentais e processos de otimização topológica.

As posições das escoras podem ser definidas tomando-se por base o campo elástico das tensões principais de compressão, sendo recomendável não desviar mais do que 15° dessas direções. Para os tirantes existe certa flexibilidade em relação às direções principais de tração, uma vez que tal metodologia pode levar a posições pouco práticas para as armaduras.

A figura 3 apresenta um exemplo de desenvolvimento de modelos de escoras e tirantes para uma vigaparede complexa, baseando-se no campo das tensões elásticas obtidas com o auxílio do Método dos Elementos Finitos. Observa-se que o modelo da figura 3 (c) procura seguir o fluxo das tensões principais de tração, conduzindo a um padrão de armadura pouco prático. O modelo da

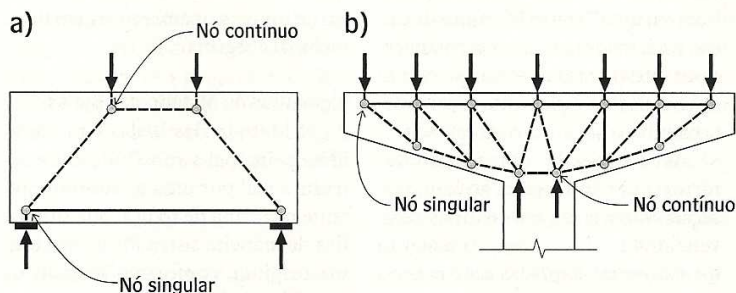


Figura 4 – Exemplo de nós contínuos e nós singulares: (a) Viga-parede e (b) Pilar

figura 3 (d), por outro lado, não segue as tensões principais de tração, mas conduz a uma armadura mais prática.

Aspectos principais das escoras de concreto

Denomina-se tensão efetiva a tensão utilizada para o dimensionamento de uma escora de concreto ou região nodal. Essa tensão constitui uma determinada fração da resistência à compressão obtida de um ensaio uniaxial e depende de diversos fatores, tais como: tipo de escora, estado de confinamento, uso de armaduras em malhas, deformações provocadas

por tirantes e ângulo de inclinação das escoras.

Três configurações típicas de escoras são suficientes para cobrir todos os campos de compressão existentes na estrutura de concreto:

- Escora prismática (*prismatic*) ou paralela (*parallel*): trata-se de um campo de tensão que se distribui uniformemente, sem perturbação, e que não produz tensões transversais de tração

- Escora em leque (*fan-shaped*): trata-se de uma idealização de um campo de tensão com curvatura desprezível, que não desenvolve tensões transversais de tração

■ Escora garrafa (*bottle-shaped*): trata-se de um tipo de escora que possui a distribuição de tensão em linhas curvilíneas com afunilamento da seção e que desenvolve tensões transversais de tração consideráveis

A partir de várias investigações analíticas, numéricas e experimentais, os autores deste trabalho propõem a adoção das equações (1) e (2) para a resistência efetiva das escoras de concreto.

$f_e = 0,63 f_{ck}$ para escoras prismáticas (1)

$f_e = 0,48 f_{ck}$ para escoras do tipo garrafa atravessadas por tirantes (2)

Deve-se observar que existe uma grande diferença de comportamento entre os casos de escoras bidimensionais (vigas-parede, por exemplo) e tridimensionais (blocos de fundação, por exemplo). Observa-se que nos casos tridimensionais a resistência tende a ser maior, principalmente devido ao efeito de confinamento disponível para as escoras.

Os autores do presente trabalho, a partir de investigações numéricas em blocos de fundação, consideram que a integridade de uma escora tridimensional pode ser garantida se a tensão atuante no ponto mais carregado da estrutura for inferior a $1,0.f_{ck}$. Trata-se de uma recomendação simplificada, que permite negligenciar o estudo mais aprofundado e complexo das escoras em casos tridimensionais.

Aspectos Principais das Regiões Nodais

Os nós ou regiões nodais podem ser classificados basicamente em dois casos, ilustrados em maiores detalhes na figura 4:

■ Nós contínuos (*smeared, continuous*): onde o desvio das forças é feito em comprimentos razoáveis e a armadura pode ser ancorada sem maiores dificuldades

■ Nós singulares ou concentrados (*singular, concentrated*): onde forças concentradas são aplicadas e o desvio de forças é feito localizadamente. Esses nós são críticos e devem ter as suas tensões verificadas, de maneira a equilibrar as forças provenientes das

escoras e dos tirantes sem produzir deformações excessivas capazes de provocar fissuração.

A partir de várias investigações analíticas, numéricas e experimentais, os autores do presente trabalho propõem a adoção das equações (3), (4) e (5) para a resistência efetiva das regiões nodais.

$f_e = 0,58 f_{ck}$ para regiões nodais circundadas por escoras ou placas de apoio (3)

$f_e = 0,46 f_{ck}$ para regiões nodais ancorando um único tirante (4)

$f_e = 0,40 f_{ck}$ para regiões nodais ancorando vários tirantes (5)

O grande problema que surge nessa etapa do processo consiste em se determinar adequadamente as dimensões e a forma dos nós. Uma maneira clássica consiste em admitir níveis de tensões iguais para todas as escoras que convergiram para o mesmo nó. Dessa maneira, pode-se garantir que no interior da região nodal existirá uma tensão igual a das escoras concorrentes, estabelecendo-se aí um estado de tensão denominado de hidrostático.

Quando se pode aproveitar os benefícios concedidos pelo Método dos Elementos Finitos, uma boa solução pode ser obtida estabelecendo a geometria do nó como sendo a área de interseção das dimensões das escoras cujas linhas centrais se encontram no nó, conforme ilustra a figura 5.

A partir das tensões atuantes na fronteira do nó pode-se aplicar a análise linear e a análise não-linear física (fissuração) para se avaliar o nível de tensão estabelecido no interior da região nodal. Observar que o tirante pode ser considerado como uma força de compressão agindo por trás do nó.

Ancoragem e distribuição dos tirantes

Normalmente, as forças de tração atuantes no modelo de treliça são absorvidas por tirantes constituídos por barras de aço. No entanto, existem situações em que se pode empregar tirantes de concreto, como por exemplo, em situações em que seja impossível disponibilizar as armaduras de aço por uma razão prática qualquer.

As armaduras dos tirantes sempre devem ser distribuídas em toda a zona efetivamente tracionada e devidamente ancoradas nas regiões nodais. A utilização de barras mais finas em maior número pode facilitar a ancoragem e melhorar a resistência das escoras e das regiões nodais.

A ancoragem tem início no ponto em que o centro de gravidade da armadura coincide com a geometria do nó e, conforme comentado, a ancoragem pode ser considerada como uma força de compressão, desde que o final da ancoragem esteja situado por detrás da região nodal. Uma ancoragem eficiente pode ser conseguida »

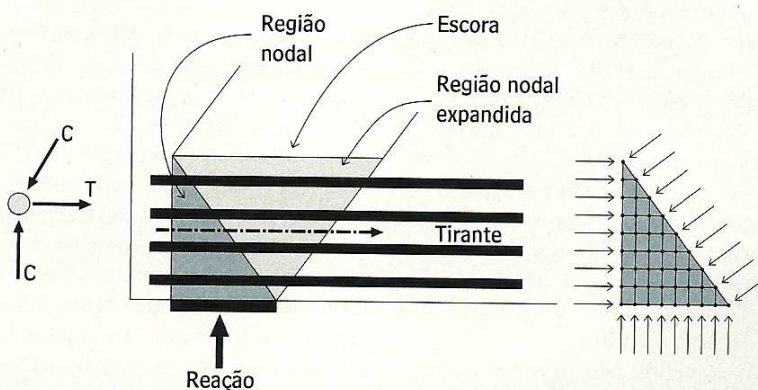


Figura 5 – Exemplo de investigação em região nodal utilizando o Método dos Elementos Finitos: (a) Tipo de nó, (b) Definição da geometria e (c) Nó com condições de fronteira

ARTIGO

dispondo um volume adequado de concreto envolvendo as armaduras do tirante pela utilização de laços e ancoragem mecânica.

Uma vez assegurada a integridade das escoras e das regiões nodais, bem como detalhada as armaduras dos tirantes, convém distribuir uma armadura ortogonal em malha na "Região D" dimensionada, de maneira a aumentar a capacidade dúctil da estrutura e controlar a abertura de fissuras indesejáveis.

Ainda existem divergências no meio técnico sobre qual quantidade deve ser adotada para a armadura adicional em malha. Os autores do presente trabalho recomendam que sempre seja adotada uma relação mínima entre a área de armadura e a área de concreto de 0,002 em cada direção, com barras espaçadas em no máximo 30 cm.

Estado Limite Último e Estado Limite de Utilização

Já é sabido que as estruturas de concreto devem apresentar comportamento adequado frente ao estado limite último e ao estado limite de utilização. O Teorema do Limite Inferior da Teoria da Plasticidade garante a segurança do Método das Bielas quanto ao Estado Limite Último.

A solução mais adotada atualmente para avaliar o Estado Limite de Utilização consiste em desprezar as aberturas de fissuras e flechas, desde que o modelo tenha sido concebido no estado limite último pelo fluxo das tensões elásticas. Normas internacionais como o CEB-FIP Model Code 1990 (1993) indicam tal procedimento.

Para a avaliação do comportamento de estruturas mais complexas concebidas com o auxílio do Método das Bielas, os autores do presente trabalho recomendam a utilização da análise não-linear física com o auxílio do Método dos Elementos Finitos.

A análise não-linear acoplada a um modelo de fissuração distribuída (*smeared model*), a partir de relações constitutivas realistas para o aço e para o concreto, podem revelar o

comportamento da estrutura dimensionada desde o início do carregamento até o colapso.

Considerações finais

A utilização do Método das Bielas acoplada ao Método dos Elementos Finitos parece ser a melhor estratégia para o dimensionamento e verificação de estruturas complexas. A análise linear conduz à construção de um modelo de escoras e tirantes racional, enquanto que a análise não-linear fornece respostas dos elementos dimensionados, desde o início do carregamento até a ruptura, passando pelas tão necessárias condições de serviço.

Alerta-se para o fato de que o Método das Bielas não pode ser tomado como uma panacéia da engenharia estrutural, como demonstra ser a princípio. Tendo em vista a obrigatoriedade da utilização das armaduras mínimas, imposta pelos códigos normativos, essa idéia de solução geral infelizmente acaba sendo derrubada.

Atualmente vários códigos normativos têm recomendado a utilização do Método das Bielas, merecendo destaque as publicações do CEB FIP Model Code 1990 (1993) e da CSA (1994), bem como publicações mais recentes e completas tais como a EHE (1999) e o ACI-318 (2002).

A NBR 6118 (2003) também recomenda a utilização do Método das Bielas, no entanto, não fornece critérios e orientações para a sua aplicação prática. Tendo em vista essa lacuna, o presente trabalho tem por objetivo apresentar uma série de parâmetros e recomendações que podem ajudar no desenvolvimento e aplicação do Método das Bielas.

Procurando contribuir com futuras revisões da NBR 6118 (2003), Souza (2004) apresenta uma proposta de prática recomendada para o Capítulo 22 da referida norma. É desejo dos autores que tais sugestões possam pelo menos ser discutidas futuramente, objetivando a consolidação de um código normativo mais claro para o projeto de regiões sujeitas a descontinuidades. «

LEIA MAIS

Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95), Appendix A: Strut-And-Tie Models. American Concrete Institute. Farmington Hills. Michigan, 2002.

NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2003.

CSA Standard-A23.3-94 – Design of Concrete Structures. Canadian Standards Association. Rexdale. Ontario, 1994.

CEB-FIP Model Code 1990. Comité Euro-International du Béton. Thomas Telford Services Ltd., London, 1993.

CEB-FIP Model Code for Concrete Structures. Comité Euro-International du Béton. Paris: Comité Euro-International du Béton/Federation Internationale de la Précontraint, 1978.

Instrucción de Hormigón Estructural. EHE. 2. ed. Ministerio de Fomento. Madrid, 1999.

Design and Detailing of Structural Concrete Using Strut-and-Tie Models. J. Schlaich; K. Schäfer. The Structural Engineer, v.69, n° 06, p.113-125, 1991.

Toward a Consistent Design of Structural Concrete. J. Schlaich; K. Schäfer; M. Jennewein: PCI Journal, v.32, n° 03, p.75-150, 1987.

Modelos de Bielas e Tirantes Aplicados a Estruturas de Concreto Armado. R. C. Silva; J. S. Giongo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2000.

Concreto Estrutural: Análise e Dimensionamento de Elementos com Descontinuidades. R. A. Souza. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004